202505990

(19)中華民國智慧財產局

(12)發明說明書公開本 (11)公開編號：TW 202505990 A

(43)公開日： 中華民國 114 (2025) 年 02 月 01 日

(21)申請案號：113127404 (22)申請日： 中華民國 113 (2024) 年 07 月 23 日

(51)Int. Cl.： *H10N50/10 (2023.01)*

(30)優先權：2023/07/28 美國 63/529,410

(71)申請人：日商ＪＳＲ 股份有限公司 (日本) JSR CORPORATION (JP)
日本
國立大學法人東京大學 (日本) THE UNIVERSITY OF TOKYO (JP)
日本
國立大學法人東北大學 (日本) TOHOKU UNIVERSITY (JP)
日本

(72)發明人：栂裕太 TOGA, YUUTA (JP) ；中辻知 NAKATSUJI, SATORU (JP) ；田中克大 TANAKA, KATSUHIRO (JP) ；是常隆 KORETSUNE, TAKASHI (JP)

(74)代理人：卓俊傑；卓孟儀；劉亞君

申請實體審查：無 申請專利範圍項數：14 項 圖式數：5 共 22 頁

(54)名稱

反鐵磁性體材料、磁性體及絕緣體的雙層膜、穿隧磁阻元件及磁記憶體

(57)摘要

反鐵磁性體材料具有六方晶的結晶結構，且具有包含 $Mn_3A_{1-x}B_x$（$0 < x < 0.5$，A=Ga、Ge、Sn，B=Mg、Al、Si、P、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Ru、Ag、Cd、In、Sb、Os、Au、Hg、Tl、Pb）、或$(Mn_{1-p}Cr_p)_3Ga_qGe_rSn_{1-q-r}$（$0 < p < 0.5$、$0 < q < 1$、$0 < r < 1$、$0 < q+r$ 1）的反鐵磁性層、及積層於其表面的絕緣體層。較佳為，A 為 Ga 及 Sn 中的至少一者。另外較佳為，B 為 Mg、Al、Si、Mn、Cu、Zn、Ag、Cd、In、Sb、Au、Tl 中的至少一個。

20250909
20250909990
專利案號：113127404

【發明摘要】

【中文發明名稱】反鐵磁性體材料、磁性體及絕緣體的雙層膜、穿隧磁阻元件及磁記憶體

【英文發明名稱】ANTIFERROMAGNETIC MATERIAL, TWO LAYER FILM OF MAGNETIC BODY AND INSULATOR, TUNNEL MAGNETORESISTIVE ELEMENT AND MAGNETIC MEMORY

【中文】

反鐵磁性體材料具有六方晶的結晶結構，且具有包含 $Mn_3A_{1-x}B_x$（$0<x<0.5$，A=Ga、Ge、Sn，B=Mg、Al、Si、P、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Ru、Ag、Cd、In、Sb、Os、Au、Hg、Tl、Pb）、或$(Mn_{1-p}Cr_p)_3Ga_qGe_rSn_{1-q-r}$（$0<p<0.5$、$0<q<1$、$0<r<1$、$0<q+r\leq 1$）的反鐵磁性層、及積層於其表面的絕緣體層。較佳為，A 為 Ga 及 Sn 中的至少一者。另外較佳為，B 為 Mg、Al、Si、Mn、Cu、Zn、Ag、Cd、In、Sb、Au、Tl 中的至少一個。

【指定代表圖】無。

【代表圖之符號簡單說明】

無

【特徵化學式】

無

【發明說明書】

【中文發明名稱】反鐵磁性體材料、磁性體及絕緣體的雙層膜、穿隧磁阻元件及磁記憶體

【英文發明名稱】ANTIFERROMAGNETIC MATERIAL, TWO LAYER FILM OF MAGNETIC BODY AND INSULATOR, TUNNEL MAGNETORESISTIVE ELEMENT AND MAGNETIC MEMORY

【技術領域】

【0001】 本揭示是有關於一種反鐵磁性體材料（antiferromagnetic material）、磁性體及絕緣體的雙層膜（two layer film of magnetic body and insulator）、穿隧磁阻元件（tunnel magnetoresistive element）及磁記憶體（magnetic memory）。

本申請案基於 2023 年 7 月 28 日向美國提出申請的美國臨時專利申請案 63/529,410 而主張優先權，並將其內容援引至本申請案中。

【先前技術】

【0002】 已知一種將絕緣體層夾持於磁化方向能夠變化的鐵磁性體層與磁化方向被固定的鐵磁性體層之間的磁阻元件。為了此種磁阻元件的高速化，正在研究使用 Mn_3Sn 等的反鐵磁性體層代替鐵磁性體（例如，參照由 H.蔡等所著，《拓撲反鐵磁態的電操縱》，《自然》，第 580 卷，第 608-613 頁（2020）（H. Tsai, et al.,「Electrical manipulation of a topological antiferromagnetic state」, Nature,

volume 580,pages 608-613（2020））。

【0003】 在國際專利申請案公報 2022/220251 號中，揭示有藉由在 Mn_3Sn 與絕緣體的接觸層之間夾持 Ta，界面的粗糙度得到抑制而經平滑化，從而磁記憶體元件的讀出訊號被增強。

【0004】 另外，由 X.陳等所著，《反鐵磁穿隧結中的八極驅動磁阻》，《自然》，第 613 卷，第 490 頁（2023）（X. Chen, et al.,「Octupole-driven magnetoresistance in an antiferromagnetic tunnel junction」, Nature 613, 490（2023））示出如下情況：藉由使強磁性體層為 Mn_3Sn 等的反鐵磁性體層，並由兩個反鐵磁性體層夾持 MgO 等的絕緣層，從而有獲得穿隧磁阻元件的可能性。

[現有技術文獻]

[專利文獻]

【0005】 專利文獻 1：國際專利申請案公報 2022/220251 號

[非專利文獻]

【0006】 非專利文獻 1：H.蔡等，《拓撲反鐵磁態的電操縱》，《自然》，第 580 卷，第 608-613 頁（2020）（H. Tsai, et al.,「Electrical manipulation of a topological antiferromagnetic state」, Nature, volume 580, pages 608-613（2020））

非專利文獻 2：X.陳等，《反鐵磁穿隧結中的八極驅動磁阻》，《自然》，第 613 卷，第 490 頁（2023）（X. Chen, et al.,「Octupole-driven magnetoresistance in an antiferromagnetic tunnel junction」, Nature, 613, 490（2023））

【發明內容】

[發明所欲解決之課題]

【0007】 在此種穿隧磁阻元件中，要求獲得耐熱性高的元件。本發明的目的在於獲得耐熱性高的穿隧磁阻元件及磁記憶體。

[解決課題之手段]

【0008】 根據本揭示的一態樣，反鐵磁性體材料包含 $Mn_3A_{1-x}B_x$（$0<x<0.5$，A=Ga、Ge、Sn，B=Mg、Al、Si、P、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Ru、Ag、Cd、In、Sb、Os、Au、Hg、Tl、Pb）、或$(Mn_{1-p}Cr_p)_3Ga_qGe_rSn_{1-q-r}$（$0<p<0.5$、$0<q<1$、$0<r<1$、$0<q+r\leq 1$），且具有六方晶的結晶結構。

【0009】 根據本揭示的另一態樣，磁性體及絕緣體的雙層膜具有包括所述鐵磁性體材料的層、及包括積層於包含鐵磁性體材料的層上的絕緣體的層。

【0010】 根據本揭示的進而另一態樣，穿隧磁阻元件具有積層於所述雙層膜的絕緣體上的第二反鐵磁性膜層。

【0011】 根據本揭示的進而又一態樣，磁記憶體包括多個所述穿隧磁阻元件。

[發明的效果]

【0012】 根據本發明，可獲得耐熱性高的穿隧磁阻元件及磁記憶體。

【圖式簡單說明】

【0013】

在考慮到與隨附圖式的關聯的情況下，藉由參照以下詳細的說明，而以逐漸更良好地理解的方式容易地獲得本揭示及其所隨附的優點的許多更全面的理解。

圖 1 是表示磁性體及絕緣體的雙層膜的一實施態樣的剖面圖。

圖 2 是表示穿隧磁阻元件的一實施態樣的剖面圖。

圖 3 是以橫軸為各位點的磁矩的絕對值的平均，以縱軸為與 Mn_3Sn 進行比較而得的倪爾溫度（計算值）之差（ΔT_N），以元素的置換量 10%為上限而繪製出的圖表。

圖 4 是對穿隧磁阻元件的動作進行說明的剖面圖。

圖 5 是磁記憶體的一實施態樣的電路圖。

【實施方式】

【0014】 在本說明書中，在量、濃度或其他值或者參數以範圍的形式來提供及/或其說明中包含上限值及下限值的列表的情況下，其可理解為：無論是否單獨揭示有更窄的範圍，均具體地揭示由所提供的範圍內的所有整數及分數、以及任意的上限值及下限值的任意組合形成的所有範圍。在本說明書中記載有數值範圍的情況下，只要無特別說明，則所述範圍意指不僅包含所述範圍內的所有整數及分數，亦包含其端點。作為一例，1～10 的範圍與 1、4、6、10 的值的列表同樣地全面記述且包含獨立的部分範圍 3.4～7.2。

【0015】 在本揭示的實施態樣中，在將絕緣體層夾持於多個反鐵磁性體層中的穿隧磁阻元件中，藉由將反鐵磁性體層設為包含 $Mn_3A_{1-x}B_x$（$0<x<0.5$，A=Ga、Ge、Sn，B=Mg、Al、Si、P、Mn、

Ni、Cu、Zn、As、Ru、Ag、Cd、In、Sb、Os、Au、Hg、Tl、Pb）、或$(Mn_{1-p}Cr_p)_3Ga_qGe_rSn_{1-q-r}$（$0<p<0.5$、$0<q<1$、$0<r<1$、$0<q+r\leq 1$）且具有六方晶的結晶結構的層，可獲得耐熱性比較高的穿隧磁阻元件。因此，若所述穿隧磁阻元件用於磁記憶體，則可獲得耐熱性比較高的磁記憶體。

【0016】 以下，對反鐵磁性體材料、各元件的實施態樣進行說明。

【0017】 [反鐵磁性體材料、磁性體及絕緣體的雙層膜以及穿隧磁阻元件]

圖 1 是表示磁性體及絕緣體的雙層膜的一實施態樣的剖面圖。在反鐵磁性體層 11 上積層有絕緣體層 12。

【0018】 另外，圖 2 是表示穿隧磁阻元件的一實施態樣的剖面圖。在反鐵磁性體層 11 上積層有絕緣體層 12，進而在絕緣體層 12 上積層有第二反鐵磁性體層 13。

【0019】 在本揭示的磁性體及絕緣體的雙層膜以及穿隧磁阻元件中，反鐵磁性體層 11 及第二反鐵磁性體層 13 的材料具有六方晶的結晶結構且為 $Mn_3A_{1-x}B_x$（$0<x<0.5$，A=Ga、Ge、Sn，B=Mg、Al、Si、P、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Ru、Ag、Cd、In、Sb、Os、Au、Hg、Tl、Pb）、或$(Mn_{1-p}Cr_p)_3Ga_qGe_rSn_{1-q-r}$（$0<p<0.5$、$0<q<1$、$0<r<1$、$0<q+r\leq 1$）。A 更佳為 Ga 及 Sn 中的至少一者，B 更佳為 Mg、Al、Si、Mn、Cu、Zn、Ag、Cd、In、Sb、Au、Tl 中的至少一個。x 較佳為 $0<x<0.5$，更佳為 $0.15<x<0.25$。另外，p 較佳為 $0<p<0.5$，更佳為 $0.15<p<0.25$。q 較佳為 $0.2<q<0.8$，更佳為 $0.4<q<0.6$。r 較佳

為 r<0.5。

【0020】 反鐵磁性體層 11 及第二反鐵磁性體層 13 的材料可彼此相同，亦可不同。該些結晶的自旋為團簇磁八極極化，藉由施加磁場、或流動電流，而能夠使由磁八極定義的網狀的自旋極化旋轉。

【0021】 另外，反鐵磁性體層 11 與第二反鐵磁性體層 13 的厚度分別獨立地為例如 0.5 nm-40 nm，較佳為 0.5 nm-30 nm，進而佳為 0.5 nm-20 nm。絕緣體層 12 的厚度例如為 0.5 nm-5 nm，較佳為 0.5 nm-4 nm，進而佳為 1 nm-3 nm。藉由各層具有此種厚度，可將電阻值調整為適合於器件應用的值。

【0022】 本揭示的發明者發現，藉由進行以下所說明的模擬，在反鐵磁性層中使用特定的材料，藉此提高熱穩定性。

【0023】 （模擬方法）

為了磁性的熱穩定性提高（倪爾溫度變高）的反鐵磁性材料的探索，在接下來的三個步驟中進行了模擬。

（1）以具有六方晶的結晶結構的反鐵磁性體 Mn_3X（X=Ga、Ge、Sn）為基準材料，針對①將 X 部分置換為其他元素的材料、及②將 Mn 部分置換為其他元素，以任意的比率組合 Ga、Ge、Sn 來代替 X 的材料$(Mn,Y)_3$(Ga-Ge-Sn)此兩種材料，倪爾溫度相對於基準材料而提高的材料的探索

（2）其中倪爾溫度以下的磁狀態與基準材料同等的材料的探索

（3）其中結構可穩定地存在的材料的探索

【0024】 以下，依次進行說明。

（1）以具有六方晶的結晶結構的 Mn_3X（X=Ga、Ge、Sn）為基準材料，針對①將 X 部分置換為任意的元素的材料、及②將 Mn 部分置換為任意的元素 Y，以任意的比率組合 Ga、Ge、Sn 來代替 X 的材料$(Mn,Y)_3$(Ga-Ge-Sn)此兩種材料，倪爾溫度相對於基準材料而提高的材料的探索

【0025】 各自進行置換的元素設為週期表的原子編號 11（Na）～83（Bi）中除稀有氣體元素外的 70 種，置換量最大設為 50%為止。另外，關於結晶的結構（晶格常數及內部座標），設為使用 Mn_3Ga、Mn_3Ge、Mn_3Sn 的實驗值，不考慮因元素的置換引起的晶格常數變化者，關於②的$(Mn,Y)_3$(Ga-Ge-Sn)，根據 Ga、Ge、Sn 的調配比，藉由相對於實驗值的線性近似來決定結晶結構。對於藉由以上操作決定的結晶結構，選擇基於第一原理計算而求出的倪爾溫度較作為基準的 Mn_3(Ga-Ge-Sn)的值而言上升的材料體系作為探索候補。關於具體的計算方法，如下所述。

【0026】 隨機置換體系的第一原理計算是使用相干勢近似（Coherent Potential Approximation，CPA）來進行。對於各摻雜體系，如以下般構建了經典自旋哈密頓函數（classic spin Hamiltonian）：

[式 1]

$$\mathcal{H} = -2\sum_{i<j} J_{ij}(n_i, n_j)\boldsymbol{s}_i \cdot \boldsymbol{s}_j \quad , \#$$

此處，$J_{ij}(n_i, n_j)$為截止長度 2a（a 為晶格常數）之前的第 i 個及第 j 個交換耦合常數，$s_{i(\cdot j)}$為第 i（，j）個位點上的歸一化經典自旋矩。耦合常數的原子 n_i 及 n_j 的種類依賴性是基於第一原理計算（安裝於 AkaiKKR 碼（http://kkr.issp.u-tokyo.ac.jp/jp/））進行計算，所述第一原理計算使用順磁性局部矩無序狀態的科林伽-科恩-勞斯特克（Korringa-Kohn-Rostoker，KKR）格林函數法及列支敦士登公式（A.I.列支敦士登等（A. I. Liechtenstein, et al. Magn. Mater., 67, 65（1987））。在所述計算中，使用了原子球近似及佩卓-貝克-埃倫霍夫（Perdew-Becke-Erzenhof，PBE）的一般化梯度近似參數化。關於稀土元素的 4f 狀態，採用了所謂的開放核心近似（open core approximation）。

【0027】 對所述哈密頓函數進行原生蒙特卡羅（Monte Carlo，MC）模擬，根據磁熱容量的峰值決定倪爾溫度。各個 MC 模擬對以不同的隨機數序列構築的 5 個-10 個原子排列執行 10 萬 MC 步長以進行緩和、執行 10 萬 MC 步長以計算磁化。

【0028】 作為一例，可獲得圖 3 所示的結果。圖 3 是以橫軸為各位點的磁矩的絕對值的平均，以縱軸為與 Mn_3Sn 進行比較而得的倪爾溫度（計算值）之差（ΔT_N），以元素的置換量 10%為上限而繪製出的圖。圖中的水平線對應於 Mn_3Sn、Mn_3Ge、Mn_3Ga，水平

線以上相當於探索材料。例如，在 Sn-體系（System）（以 Mn_3Sn 為基礎對元素進行置換而得者）的區域中，$\Delta T_N>0$ 者相當於探索材料。

【0029】（2）其中倪爾溫度以下的磁狀態與基準材料同等的材料的探索

對於所述（1）中獲得的材料體系，藉由 Monte Carlo 計算求出倪爾溫度以下的磁結構，選擇具有與原本的 Mn_3X（X=Ga、Ge、Sn）相同的團簇磁八極極化者。

【0030】（3）其中結構可穩定地存在的材料的探索

對於所述（2）中獲得的材料體系，藉由導入了全電勢（Full Potential）法的 KKR-CPA 法並基於形成能的凸包（Convex Hull）來調查合金的能穩定性。在與已知已經在實驗上穩定的 Mn_3Sn 中的 Sn 的 Ge 置換或 Ga 置換進行比較時，選擇能量穩定程度相同者。

【0031】藉由以上的模擬計算，發現：在穿隧磁阻元件中，若將反鐵磁性體層 11 及第二反鐵磁性層 13 的材料設為 $Mn_3A_{1-x}B_x$（$0<x<0.5$，A=Ga、Ge、Sn，B=Mg、Al、Si、P、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Ru、Ag、Cd、In、Sb、Os、Au、Hg、Tl、Pb）、或$(Mn_{1-p}Cr_p)_3Ga_qGe_rSn_{1-q-r}$（$0<p<0.5$、$0<q<1$、$0<r<1$、$0<q+r\leq 1$），則磁性的熱穩定性（倪爾溫度）提高，且可在能量方面亦可穩定地存在。

【0032】在本揭示的一個實施態樣中，反鐵磁性體層的倪爾溫度（計算值）具有較 Mn_3Sn 的倪爾溫度（計算值）高 10 K 以上的倪

爾溫度。再者，Mn_3Sn 的倪爾溫度（計算值）為約 420 K。

【0033】 在本揭示的一個實施態樣中，反鐵磁性體層（即，$Mn_3A_{1-x}B_x$（$0<x<0.5$，A=Ga、Ge、Sn，B=Mg、Al、Si、P、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Ru、Ag、Cd、In、Sb、Os、Au、Hg、Tl、Pb）、或$(Mn_{1-p}Cr_p)_3Ga_qGe_rSn_{1-q-r}$（$0<p<0.5$、$0<q<1$、$0<r<1$、$0<q+r\leq 1$））在倪爾溫度以下具有與 Mn_3X（X=Ga、Ge、Sn）相同的團簇磁八極極化，所述 Mn_3X（X=Ga、Ge、Sn）成為在模擬計算中找到材料時的基準。

【0034】 在本揭示的一個實施態樣中，反鐵磁性體層的相同組成中的四方（Tetragonal）結構及六方（Hexagonal）結構的能量差具有較 Mn_3Sn 或 Mn_3Ga 的值小的值。

【0035】 在本揭示的一個實施態樣中，絕緣體層與兩個反鐵磁性體層直接相接。在另一實施態樣中，絕緣體層與反鐵磁性體層之間介隔一個以上的其他層。作為配置於反鐵磁性體層與絕緣體層之間的其他層，只要能夠藉由濺鍍、磊晶成長（分子束磊晶（Molecular beam epitaxy，MBE）、金屬有機氣相沈積（Metal Organic Chemical Vapor Deposition，MOCVD）等）等公知的成膜手段來成膜，則並無特別限定。作為此時的一個以上的其他層可例示包含 Ta 或 Ru 作為材料的層。

【0036】 [磁性體及絕緣體的雙層膜以及穿隧磁阻元件的製造方法]

磁性體及絕緣體的雙層膜以及穿隧磁阻元件可藉由如下流程而製成：（1）反鐵磁性體層 11 的製成；（2）絕緣體層 12 向反鐵磁

性體層 11 的積層；（3）第二反鐵磁性體層 13 向絕緣體層 12 的積層。以下，進行具體的說明。

【0037】 （1）反鐵磁性體層 11 的製成

反鐵磁性體層 11 可藉由如下方式而製成：藉由濺鍍、磊晶成長（MBE、MOCVD 等）等公知的成膜手段在作為電極的基板上使本揭示的材料成膜。在使用濺鍍的情況下，例如，作為靶材料而使用與作為進行成膜的對象的 $Mn_3A_{1-x}B_x$（$0<x<0.5$，A=Ga、Ge、Sn，B=Mg、Al、Si、P、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Ru、Ag、Cd、In、Sb、Os、Au、Hg、Tl、Pb）、或$(Mn_{1-p}Cr_p)_3Ga_qGe_rSn_{1-q-r}$（$0<p<0.5$、$0<q<1$、$0<r<1$、$0<q+r\leq1$）相同的材料。

【0038】 關於作為電極的基板的材料（基板電極層）可例示 W、Pt 或 Ta，其厚度典型而言為 1 nm-20 nm，較佳為 1 nm-5 nm。

【0039】 （2）絕緣體層 12 向反鐵磁性體層 11 的積層

接著，藉由濺鍍等公知的成膜手段在反鐵磁性體層 11 上使絕緣體層 12 成膜。在使用濺鍍的情況下，作為靶材料，可使用金屬的氧化物、氮化物、氧氮化物等。亦可使用在氧氣氛或氮氣氛下的反應性濺鍍。

【0040】 （3）第二反鐵磁性體層 13 向絕緣體層 12 的積層

接下來，反鐵磁性體層 13 可藉由如下方式而製成：藉由磊晶成長（MBE、MOCVD 等）等公知的成膜手段在絕緣體層 12 上使本揭示的材料成膜。

【0041】 在使用濺鍍的情況下，可例示與所述反鐵磁性體層 11 相

同的靶材料。

【0042】 [穿隧磁阻元件的動作]

圖 4 是表示穿隧磁阻元件的一實施態樣的剖面圖。在基板電極層 10 上，在反鐵磁性體層 11 的表面依次積層有絕緣體層 12、第二反鐵磁性層 13。此處，作為基板電極層 10 的材料，可例示 W、Pt 或 Ta 來作為自旋流生成材料。

【0043】 第一反鐵磁性層的網狀的自旋極化方向較佳為垂直於反鐵磁性體層 11，但亦可傾斜。在所述穿隧磁阻元件中，電阻依賴於反鐵磁性體層 11 的自旋極化方向與第二反鐵磁性體層 13 的自旋極化方向的相對角度而發生變化。因此，藉由使反鐵磁性體層 11 的自旋極化方向旋轉，可切換低電阻狀態與高電阻狀態。此種穿隧磁阻元件可藉由使用切換前後的電阻值的差異作為儲存資訊而作為儲存單元來發揮功能。

【0044】 例如，當在基板電極層 10 中的層平行方向（例如圖 4 內水平虛線箭頭方向）流動電流時，由於自旋軌道相互作用，在與電流正交的方向上產生自旋流（自旋霍爾效應（spin Hall effect）），從而在反鐵磁性體層 11 內產生磁轉矩。藉由改變基板電極層 10 中的電流方向，而在反鐵磁性體層 11 內產生自旋極化方向旋轉。

【0045】 如之前所說明般，反鐵磁性體層 11 與第二反鐵磁性體層 13 可由相同的材料形成，亦可由不同的材料形成。就增大低電阻狀態與高電阻狀態之差的觀點而言，較佳為反鐵磁性體層 11 的自旋極化方向與第二反鐵磁性體層 13 的自旋極化方向朝向相互平行

的面內。即，若反鐵磁性體層 11 的自旋極化方向與層方向大致垂直，則較佳為第二反鐵磁性層 13 的自旋極化方向亦與層方向大致垂直，若第一反鐵磁性層 11 的自旋極化方向與層方向大致平行，則較佳為第二反鐵磁性層 13 的自旋極化方向亦與層方向大致平行。

【0046】 在本揭示的穿隧磁阻元件中，根據反鐵磁性體層的表面的面取向，藉由在絕緣體層中使用特定的材料，可在比較高的溫度下獲得 TMR 比。

【0047】 [磁記憶體]

藉由使用多個所述說明的穿隧磁阻元件作為儲存單元，可構成磁記憶體。所述磁記憶體可使用公知的結構。例如，可使用美國專利申請案公開公報 2022/0149269 號及美國專利申請案公開公報 2019/0267540 中記載的磁記憶體的結構。將與磁記憶體的結構相關的美國專利申請案公開公報 2022/0149269 號及美國專利申請案公開公報 2019/0267540 的記載併入（incorporated）本說明書中。

【0048】 圖 5 是表示構成本揭示的磁記憶體的一部分的儲存單元的配線的一實施態樣的電路圖。如圖 5 所示的儲存單元以矩陣狀配置而被驅動。

【0049】 在各儲存單元內，在積層於基板電極層 10 的反鐵磁性體層 11 的表面依次積層有絕緣體層 12、第二反鐵磁性體層 13，並形成有穿隧磁阻元件。所述穿隧磁阻元件的動作與穿隧磁阻元件中說明的內容相同。

【0050】 在基板電極層 10 設置有兩個供電電極 15、15，供電電極

15、供電電極 15 分別與電晶體 19、電晶體 19 的源極連接。電晶體 19、電晶體 19 的閘極與字元線 17 連接，兩個電晶體 19、19 的汲極分別與第一寫入位元線 18 及第二寫入位元線 18'連接。第二反鐵磁性體層 13 經由電極 14 而與讀取位元線 16 連接。

【0051】 此處，在使電阻值變化來進行資料的切換的情況下，為了為一種資料狀態，而將第一寫入位元線 18 設定為 H 電平，將第二寫入位元線 18'設定為 L 電平。然後，藉由將字元線 17 設定為 H 電平，電流自第一寫入位元線 18 朝向第二寫入位元線 18'而在基板電極層 10 內流動，反鐵磁性體層 11 的自旋極化成為與所述電流對應的狀態，所述情況為一種資料狀態。

【0052】 在進行所述資料的切換的情況下，將第一寫入位元線 18 設定為 L 電平，將第二寫入位元線 18'設定為 H 電平。然後，藉由將字元線 17 設定為 H 電平，電流自第二寫入位元線 18'朝向第一寫入位元線 18 而在基板電極層 10 內流動，反鐵磁性體層 11 的自旋極化發生變化，從而資料被切換。

【0053】 在讀出儲存於儲存單元中的資料的情況下，將第一寫入位元線 18 與第二寫入位元線 18'中的任一者設定為 H 電平，並釋放另一者。然後，藉由將讀取位元線 16 設定為 L 電平，將字元線 17 設定為 H 電平，電流自第一寫入位元線 18 與第二寫入位元線 18'流向讀取位元線 16，因此藉由測定所述電流的大小，判別儲存單元處於高電阻狀態還是處於低電阻狀態，從而獲取儲存單元中所寫的資料。

【0054】 在磁記憶體的一實施態樣中，藉由將如圖 4 所示的儲存單元排列於矩陣上，並利用控制器控制寫入位元線與讀取位元線、字元線的電平來進行規定的寫入讀取動作。

【0055】 在本實施態樣的磁記憶體中，根據反鐵磁性體層的表面的面取向，藉由在反鐵磁性體層中使用特定的材料，可在比較高的溫度下獲得讀取訊號。

【0056】 顯然，根據所述指點，能夠實現本發明的許多修改及變形。因此，應理解，在隨附的申請專利範圍內，本發明可利用本說明書中具體記載以外的方法來實施。

[產業上之可利用性]

【0057】 本發明的反鐵磁性體材料、磁性體及絕緣體的雙層膜可用作穿隧磁阻元件及磁記憶體。

【符號說明】

【0058】

10:基板電極層

11:反鐵磁性體層

12:絕緣體層

13:第二反鐵磁性體層

14:電極

15:供電電極

19:電晶體

17:字元線

18:第一寫入位元線

18’:第二寫入位元線

16:讀取位元線

【發明申請專利範圍】

【請求項1】 一種反鐵磁性體材料，具有六方晶的結晶結構，且包含 $Mn_3A_{1-x}B_x$（$0<x<0.5$，A=Ga、Ge、Sn，B=Mg、Al、Si、P、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Ru、Ag、Cd、In、Sb、Os、Au、Hg、Tl、Pb）、或$(Mn_{1-p}Cr_p)_3Ga_qGe_rSn_{1-q-r}$（$0<p<0.5$、$0<q<1$、$0<r<1$、$0<q+r\leq 1$）。

【請求項2】 如請求項 1 所述的反鐵磁性體材料，其中，A 為 Ga 及 Sn 中的至少一者。

【請求項3】 如請求項 1 或 2 所述的反鐵磁性體材料，其中，B 為 Mg、Al、Si、Mn、Cu、Zn、Ag、Cd、In、Sb、Au、Tl 中的至少一個。

【請求項4】 如請求項 1 至 3 中任一項所述的反鐵磁性體材料，其中，$0<x<0.5$、$0<p<0.5$、$0.2<q<0.8$ 且 $r<0.5$。

【請求項5】 一種磁性體及絕緣體的雙層膜，具有包括如請求項 1 至 4 中任一項所述的鐵磁性體材料的層、及包括積層於包含鐵磁性體材料的層上的絕緣體的層。

【請求項6】 一種穿隧磁阻元件，具有如請求項 5 所述的磁性體及絕緣體的雙層膜、及積層於雙層膜的絕緣體上的第二反鐵磁性膜層。

【請求項7】 一種磁記憶體，包括多個如請求項 6 所述的穿隧磁阻元件。

【請求項8】 一種反鐵磁性體材料，具有六方晶的結晶結構，且包含 $Mn_3A_{1-x}B_x$（$0<x<0.5$，A=Ga、Ge、Sn，B=Mg、Al、Si、P、Mn、

Ni、Cu、Zn、Ru、Ag、Cd、In、Os、Au、Hg、Tl）、或$(Mn_{1-p}Cr_p)_3Ga_qGe_rSn_{1-q-r}$（$0<p<0.5$、$0<q<1$、$0<r<1$、$0<q+r\leq 1$）。

【請求項9】 如請求項 1 所述的反鐵磁性體材料，其中，A 為 Ga 及 Sn 中的至少一者。

【請求項10】 如請求項 8 或 9 所述的反鐵磁性體材料，其中，B 為 Mg、Al、Si、Mn、Cu、Zn、Ag、Cd、In、Au、Tl 中的至少一個。

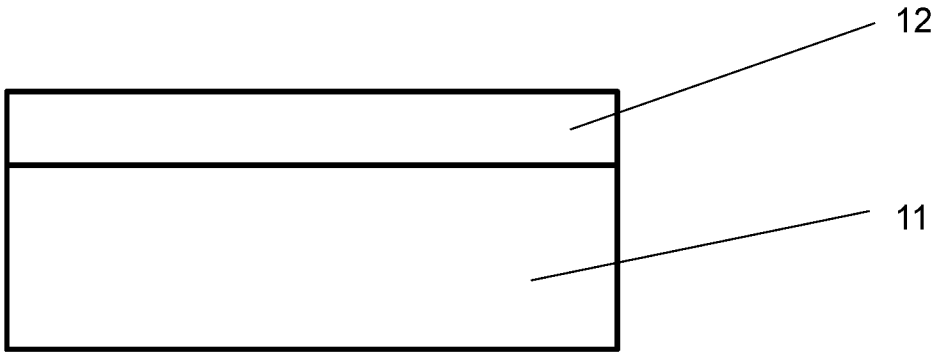
【請求項11】 如請求項 8 至 10 中任一項所述的反鐵磁性體材料，其中，$0<x<0.5$、$0<p<0.5$、$0.2<q<0.8$ 且 $r<0.5$。

【請求項12】 一種磁性體及絕緣體的雙層膜，具有包括如請求項 8 至 11 中任一項所述的鐵磁性體材料的層、及包括積層於包含鐵磁性體材料的層上的絕緣體的層。

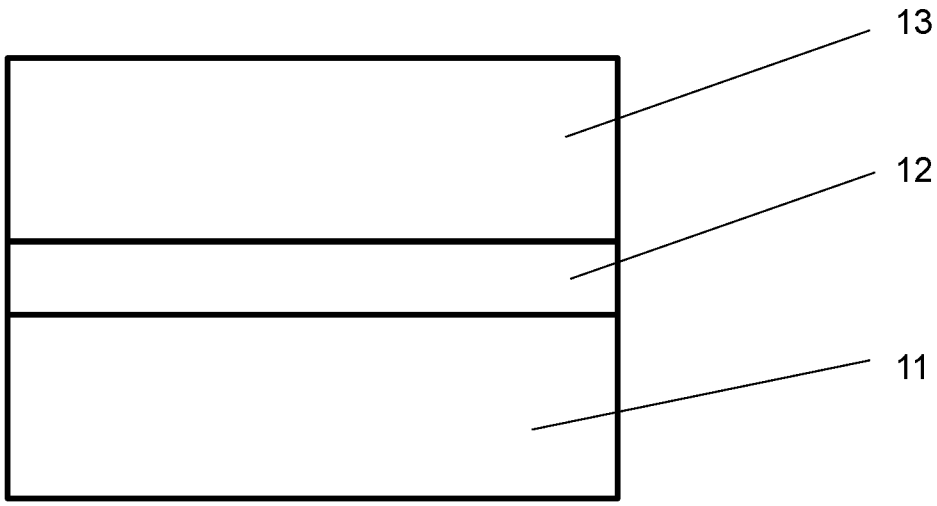
【請求項13】 一種穿隧磁阻元件，具有如請求項 12 所述的磁性體及絕緣體的雙層膜、及積層於雙層膜的絕緣體上的第二反鐵磁性膜層。

【請求項14】 一種磁記憶體，包括多個如請求項 13 所述的穿隧磁阻元件。

【發明圖式】



【圖1】



【圖2】

ATN₂K 相對於 TN(Dm₂Sn)
Mg₂Sn
Mg₂Ge
Mg₂Si
(Mg, Fe)₂Ge
(Mg, Fe)₂Si
(Mg, Fe)₂Sn
1.8
2.0
2.2
2.4
2.6
圖 3A
合一台電子磁矩 μB

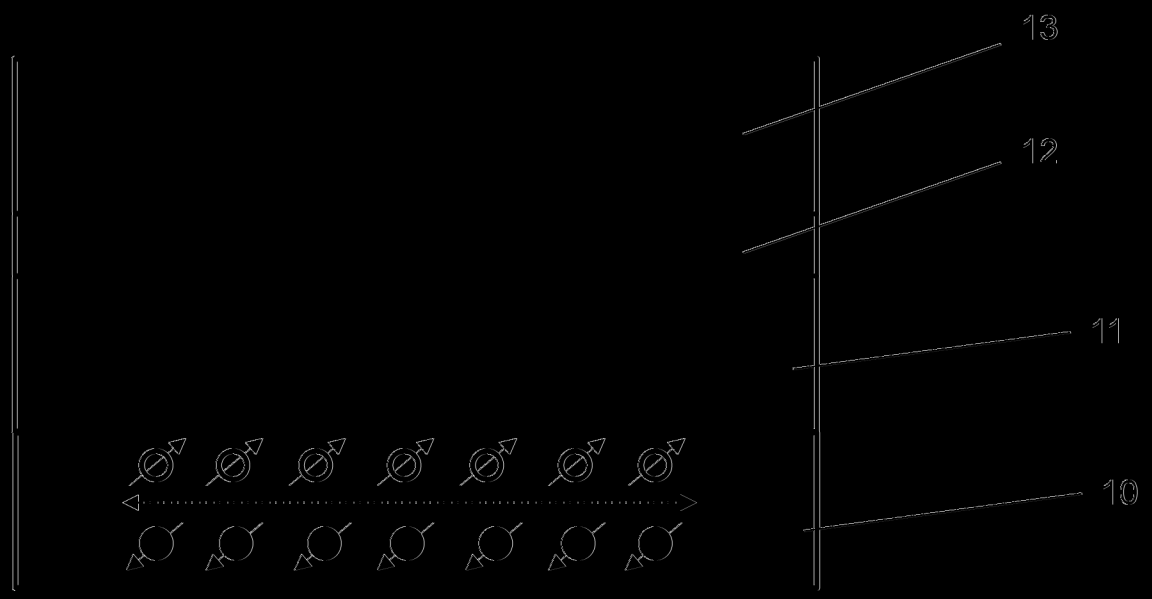


圖4

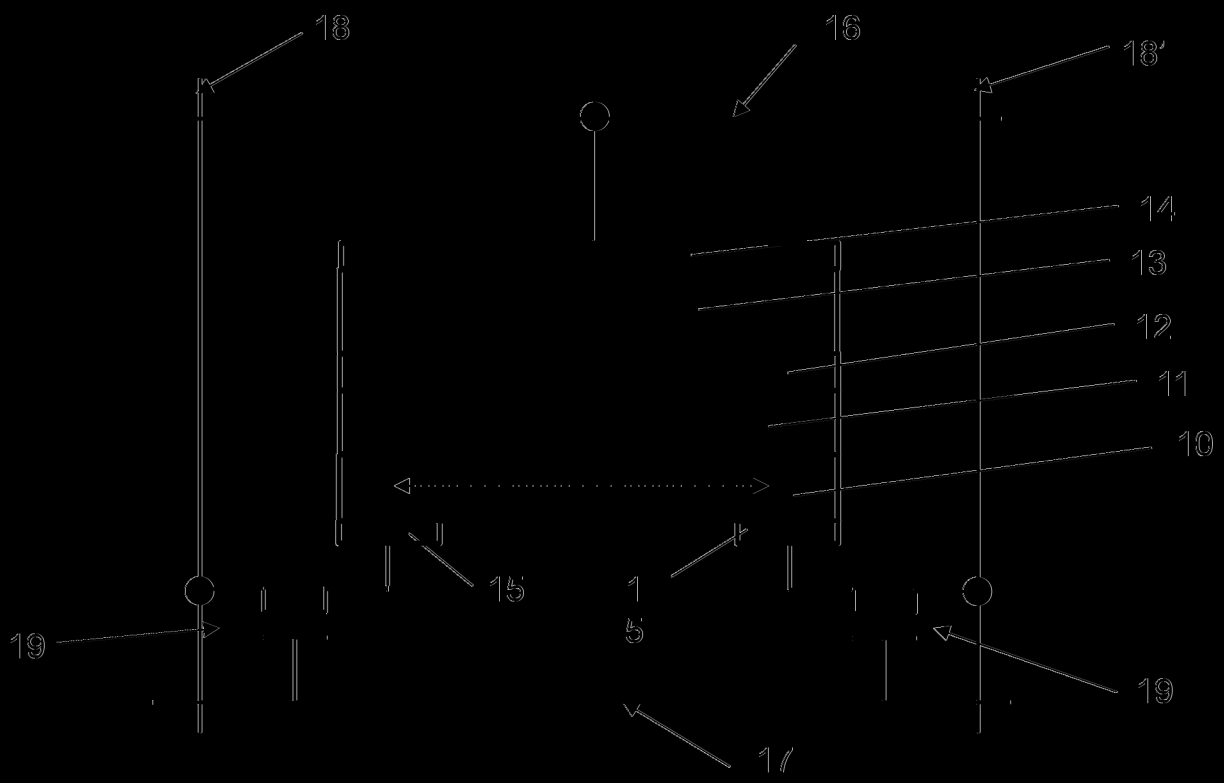


圖5

【發明摘要】

【中文發明名稱】反鐵磁性體材料、磁性體及絕緣體的雙層膜、穿隧磁阻元件及磁記憶體

【英文發明名稱】ANTIFERROMAGNETIC MATERIAL, TWO LAYER FILM OF MAGNETIC BODY AND INSULATOR, TUNNEL MAGNETORESISTIVE ELEMENT AND MAGNETIC MEMORY

【中文】

反鐵磁性體材料具有六方晶的結晶結構，且具有包含 $Mn_3A_{1-x}B_x$（$0<x<0.5$，A=Ga、Ge、Sn，B=Mg、Al、Si、P、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Ru、Ag、Cd、In、Sb、Os、Au、Hg、Tl、Pb）、或$(Mn_{1-p}Cr_p)_3Ga_qGe_rSn_{1-q-r}$（$0<p<0.5$、$0<q<1$、$0<r<1$、$0<q+r\leq1$）的反鐵磁性體層、及積層於其表面的絕緣體層。較佳為，A 為 Ga 及 Sn 中的至少一者。另外較佳為，B 為 Mg、Al、Si、Mn、Cu、Zn、Ag、Cd、In、Sb、Au、Tl 中的至少一個。

【指定代表圖】無。

【代表圖之符號簡單說明】

無

【特徵化學式】

無

修正日期:113年09月11日

【發明說明書】

【中文發明名稱】反鐵磁性體材料、磁性體及絕緣體的雙層膜、穿隧磁阻元件及磁記憶體

【英文發明名稱】ANTIFERROMAGNETIC MATERIAL, TWO LAYER FILM OF MAGNETIC BODY AND INSULATOR, TUNNEL MAGNETORESISTIVE ELEMENT AND MAGNETIC MEMORY

【技術領域】

【0001】 本揭示是有關於一種反鐵磁性體材料（antiferromagnetic material）、磁性體及絕緣體的雙層膜（two layer film of magnetic body and insulator）、穿隧磁阻元件（tunnel magnetoresistive element）及磁記憶體（magnetic memory）。

本申請案基於 2023 年 7 月 28 日向美國提出申請的美國臨時專利申請案 63/529,410 而主張優先權，並將其內容援引至本申請案中。

【先前技術】

【0002】 已知一種將絕緣體層夾持於磁化方向能夠變化的鐵磁性體層與磁化方向被固定的鐵磁性體層之間的磁阻元件。為了此種磁阻元件的高速化，正在研究使用 Mn_3Sn 等的反鐵磁性體層代替鐵磁性體（例如，參照由 H.蔡等所著，《拓撲反鐵磁態的電操縱》，《自然》，第 580 卷，第 608-613 頁（2020）（H. Tsai, et al.,「Electrical manipulation of a topological antiferromagnetic state」, Nature,

volume 580,pages 608-613（2020））)。

【0003】 在國際專利申請案公報 2022/220251 號中，揭示有藉由在 Mn_3Sn 與絕緣體的接觸層之間夾持 Ta，界面的粗糙度得到抑制而經平滑化，從而磁記憶體元件的讀出訊號被增強。

【0004】 另外，由 X.陳等所著，《反鐵磁穿隧結中的八極驅動磁阻》，《自然》，第 613 卷，第 490 頁（2023）（X. Chen, et al.,「Octupole-driven magnetoresistance in an antiferromagnetic tunnel junction」, Nature 613, 490（2023））示出如下情況：藉由使強磁性體層為 Mn_3Sn 等的反鐵磁性體層，並由兩個反鐵磁性體層夾持 MgO 等的絕緣體層，從而有獲得穿隧磁阻元件的可能性。

[現有技術文獻]

[專利文獻]

【0005】 專利文獻 1：國際專利申請案公報 2022/220251 號

[非專利文獻]

【0006】 非專利文獻 1：H.蔡等，《拓撲反鐵磁態的電操縱》，《自然》，第 580 卷，第 608-613 頁（2020）（H. Tsai, et al.,「Electrical manipulation of a topological antiferromagnetic state」, Nature, volume 580, pages 608-613（2020））

非專利文獻 2：X.陳等，《反鐵磁穿隧結中的八極驅動磁阻》，《自然》，第 613 卷，第 490 頁（2023）（X. Chen, et al.,「Octupole-driven magnetoresistance in an antiferromagnetic tunnel junction」, Nature, 613, 490（2023））

【發明內容】

[發明所欲解決之課題]

【0007】 在此種穿隧磁阻元件中，要求獲得耐熱性高的元件。本發明的目的在於獲得耐熱性高的穿隧磁阻元件及磁記憶體。

[解決課題之手段]

【0008】 根據本揭示的一態樣，反鐵磁性體材料包含 $Mn_3A_{1-x}B_x$（$0<x<0.5$，A=Ga、Ge、Sn，B=Mg、Al、Si、P、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Ru、Ag、Cd、In、Sb、Os、Au、Hg、Tl、Pb）、或$(Mn_{1-p}Cr_p)_3Ga_qGe_rSn_{1-q-r}$（$0<p<0.5$、$0<q<1$、$0<r<1$、$0<q+r\leq 1$），且具有六方晶的結晶結構。

【0009】 根據本揭示的另一態樣，磁性體及絕緣體的雙層膜具有包括所述反鐵磁性體材料的層、及包括積層於包含反鐵磁性體材料的層上的絕緣體的層。

【0010】 根據本揭示的進而另一態樣，穿隧磁阻元件具有積層於所述雙層膜的絕緣體上的第二反鐵磁性體層。

【0011】 根據本揭示的進而又一態樣，磁記憶體包括多個所述穿隧磁阻元件。

[發明的效果]

【0012】 根據本發明，可獲得耐熱性高的穿隧磁阻元件及磁記憶體。

【圖式簡單說明】

【0013】

在考慮到與隨附圖式的關聯的情況下，藉由參照以下詳細的說明，而以逐漸更良好地理解的方式容易地獲得本揭示及其所隨附的優點的許多更全面的理解。

圖 1 是表示磁性體及絕緣體的雙層膜的一實施態樣的剖面圖。

圖 2 是表示穿隧磁阻元件的一實施態樣的剖面圖。

圖 3 是以橫軸為各位點的磁矩的絕對值的平均，以縱軸為與 Mn_3Sn 進行比較而得的倪爾溫度（計算值）之差（ΔT_N），以元素的置換量 10%為上限而繪製出的圖表。

圖 4 是對穿隧磁阻元件的動作進行說明的剖面圖。

圖 5 是磁記憶體的一實施態樣的電路圖。

【實施方式】

【0014】 在本說明書中，在量、濃度或其他值或者參數以範圍的形式來提供及/或其說明中包含上限值及下限值的列表的情況下，其可理解為：無論是否單獨揭示有更窄的範圍，均具體地揭示由所提供的範圍內的所有整數及分數、以及任意的上限值及下限值的任意組合形成的所有範圍。在本說明書中記載有數值範圍的情況下，只要無特別說明，則所述範圍意指不僅包含所述範圍內的所有整數及分數，亦包含其端點。作為一例，1～10 的範圍與 1、4、6、10 的值的列表同樣地全面記述且包含獨立的部分範圍 3.4～7.2。

【0015】 在本揭示的實施態樣中，在將絕緣體層夾持於多個反鐵磁性體層中的穿隧磁阻元件中，藉由將反鐵磁性體層設為包含 $Mn_3A_{1-x}B_x$（$0<x<0.5$，A=Ga、Ge、Sn，B=Mg、Al、Si、P、Mn、

Ni、Cu、Zn、As、Ru、Ag、Cd、In、Sb、Os、Au、Hg、Tl、Pb）、或$(Mn_{1-p}Cr_p)_3Ga_qGe_rSn_{1-q-r}$（$0<p<0.5$、$0<q<1$、$0<r<1$、$0<q+r\leq1$）且具有六方晶的結晶結構的層，可獲得耐熱性比較高的穿隧磁阻元件。因此，若所述穿隧磁阻元件用於磁記憶體，則可獲得耐熱性比較高的磁記憶體。

【0016】 以下，對反鐵磁性體材料、各元件的實施態樣進行說明。

【0017】 [反鐵磁性體材料、磁性體及絕緣體的雙層膜以及穿隧磁阻元件]

圖 1 是表示磁性體及絕緣體的雙層膜的一實施態樣的剖面圖。在反鐵磁性體層 11 上積層有絕緣體層 12。

【0018】 另外，圖 2 是表示穿隧磁阻元件的一實施態樣的剖面圖。在反鐵磁性體層 11 上積層有絕緣體層 12，進而在絕緣體層 12 上積層有第二反鐵磁性體層 13。

【0019】 在本揭示的磁性體及絕緣體的雙層膜以及穿隧磁阻元件中，反鐵磁性體層 11 及第二反鐵磁性體層 13 的材料具有六方晶的結晶結構且為 $Mn_3A_{1-x}B_x$（$0<x<0.5$，A=Ga、Ge、Sn，B=Mg、Al、Si、P、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Ru、Ag、Cd、In、Sb、Os、Au、Hg、Tl、Pb）、或$(Mn_{1-p}Cr_p)_3Ga_qGe_rSn_{1-q-r}$（$0<p<0.5$、$0<q<1$、$0<r<1$、$0<q+r\leq1$）。A 更佳為 Ga 及 Sn 中的至少一者，B 更佳為 Mg、Al、Si、Mn、Cu、Zn、Ag、Cd、In、Sb、Au、Tl 中的至少一個。x 較佳為 $0<x<0.5$，更佳為 $0.15<x<0.25$。另外，p 較佳為 $0<p<0.5$，更佳為 $0.15<p<0.25$。q 較佳為 $0.2<q<0.8$，更佳為 $0.4<q<0.6$。r 較佳

為 r<0.5。

【0020】 反鐵磁性體層 11 及第二反鐵磁性體層 13 的材料可彼此相同，亦可不同。該些結晶的自旋為團簇磁八極極化，藉由施加磁場、或流動電流，而能夠使由磁八極定義的網狀的自旋極化旋轉。

【0021】 另外，反鐵磁性體層 11 與第二反鐵磁性體層 13 的厚度分別獨立地為例如 0.5 nm-40 nm，較佳為 0.5 nm-30 nm，進而佳為 0.5 nm-20 nm。絕緣體層 12 的厚度例如為 0.5 nm-5 nm，較佳為 0.5 nm-4 nm，進而佳為 1 nm-3 nm。藉由各層具有此種厚度，可將電阻值調整為適合於器件應用的值。

【0022】 本揭示的發明者發現，藉由進行以下所說明的模擬，在反鐵磁性體層中使用特定的材料，藉此提高熱穩定性。

【0023】 （模擬方法）

為了磁性的熱穩定性提高（倪爾溫度變高）的反鐵磁性體材料的探索，在接下來的三個步驟中進行了模擬。

（1）以具有六方晶的結晶結構的反鐵磁性體 Mn_3X（X=Ga、Ge、Sn）為基準材料，針對①將 X 部分置換為其他元素的材料、及②將 Mn 部分置換為其他元素，以任意的比率組合 Ga、Ge、Sn 來代替 X 的材料$(Mn,Y)_3$(Ga-Ge-Sn)此兩種材料，倪爾溫度相對於基準材料而提高的材料的探索

（2）其中倪爾溫度以下的磁狀態與基準材料同等的材料的探索

（3）其中結構可穩定地存在的材料的探索

【0024】 以下，依次進行說明。

（1）以具有六方晶的結晶結構的 Mn_3X（X=Ga、Ge、Sn）為基準材料，針對①將 X 部分置換為任意的元素的材料、及②將 Mn 部分置換為任意的元素 Y，以任意的比率組合 Ga、Ge、Sn 來代替 X 的材料$(Mn,Y)_3$(Ga-Ge-Sn)此兩種材料，倪爾溫度相對於基準材料而提高的材料的探索

【0025】 各自進行置換的元素設為週期表的原子編號 11（Na）～83（Bi）中除稀有氣體元素外的 70 種，置換量最大設為 50%為止。另外，關於結晶的結構（晶格常數及內部座標），設為使用 Mn_3Ga、Mn_3Ge、Mn_3Sn 的實驗值，不考慮因元素的置換引起的晶格常數變化者，關於②的$(Mn,Y)_3$(Ga-Ge-Sn)，根據 Ga、Ge、Sn 的調配比，藉由相對於實驗值的線性近似來決定結晶結構。對於藉由以上操作決定的結晶結構，選擇基於第一原理計算而求出的倪爾溫度較作為基準的 Mn_3(Ga-Ge-Sn)的值而言上升的材料體系作為探索候補。關於具體的計算方法，如下所述。

【0026】 隨機置換體系的第一原理計算是使用相干勢近似（Coherent Potential Approximation，CPA）來進行。對於各摻雜體系，如以下般構建了經典自旋哈密頓函數（classic spin Hamiltonian）：

[式 1]

$$\mathcal{H} = -2\sum_{i<j} J_{ij}(n_i, n_j)\boldsymbol{s}_i \cdot \boldsymbol{s}_j \quad , \#$$

此處，$J_{ij}(n_i, n_j)$為截止長度 2a（a 為晶格常數）之前的第 i 個及第 j 個交換耦合常數，$s_{i(,j)}$為第 i（，j）個位點上的歸一化經典自旋矩。耦合常數的原子 n_i 及 n_j 的種類依賴性是基於第一原理計算（安裝於 AkaiKKR 碼（http://kkr.issp.u-tokyo.ac.jp/jp/））進行計算，所述第一原理計算使用順磁性局部矩無序狀態的科林伽-科恩-勞斯特克（Korringa-Kohn-Rostoker，KKR）格林函數法及列支敦士登公式（A.I.列支敦士登等（A. I. Liechtenstein, et al. Magn. Mater., 67, 65（1987））。在所述計算中，使用了原子球近似及佩卓-貝克-埃倫霍夫（Perdew-Becke-Erzenhof，PBE）的一般化梯度近似參數化。關於稀土元素的 4f 狀態，採用了所謂的開放核心近似（open core approximation）。

【0027】 對所述哈密頓函數進行原生蒙特卡羅（Monte Carlo，MC）模擬，根據磁熱容量的峰值決定倪爾溫度。各個 MC 模擬對以不同的隨機數序列構築的 5 個-10 個原子排列執行 10 萬 MC 步長以進行緩和、執行 10 萬 MC 步長以計算磁化。

【0028】 作為一例，可獲得圖 3 所示的結果。圖 3 是以橫軸為各位點的磁矩的絕對值的平均，以縱軸為與 Mn_3Sn 進行比較而得的倪爾溫度（計算值）之差（ΔT_N），以元素的置換量 10%為上限而繪製出的圖。圖中的水平線對應於 Mn_3Sn、Mn_3Ge、Mn_3Ga，水平

線以上相當於探索材料。例如，在 Sn-體系（System）（以 Mn_3Sn 為基礎對元素進行置換而得者）的區域中，$\Delta T_N>0$ 者相當於探索材料。

【0029】（2）其中倪爾溫度以下的磁狀態與基準材料同等的材料的探索

對於所述（1）中獲得的材料體系，藉由 Monte Carlo 計算求出倪爾溫度以下的磁結構，選擇具有與原本的 Mn_3X（X=Ga、Ge、Sn）相同的團簇磁八極極化者。

【0030】（3）其中結構可穩定地存在的材料的探索

對於所述（2）中獲得的材料體系，藉由導入了全電勢（Full Potential）法的 KKR-CPA 法並基於形成能的凸包（Convex Hull）來調查合金的能穩定性。在與已知已經在實驗上穩定的 Mn_3Sn 中的 Sn 的 Ge 置換或 Ga 置換進行比較時，選擇能量穩定程度相同者。

【0031】藉由以上的模擬計算，發現：在穿隧磁阻元件中，若將反鐵磁性體層 11 及第二反鐵磁性體層 13 的材料設為 $Mn_3A_{1-x}B_x$（$0<x<0.5$，A=Ga、Ge、Sn，B=Mg、Al、Si、P、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Ru、Ag、Cd、In、Sb、Os、Au、Hg、Tl、Pb）、或$(Mn_{1-p}Cr_p)_3Ga_qGe_rSn_{1-q-r}$（$0<p<0.5$、$0<q<1$、$0<r<1$、$0<q+r\leq 1$），則磁性的熱穩定性（倪爾溫度）提高，且可在能量方面亦可穩定地存在。

【0032】在本揭示的一個實施態樣中，反鐵磁性體層的倪爾溫度（計算值）具有較 Mn_3Sn 的倪爾溫度（計算值）高 10 K 以上的倪

爾溫度。再者，Mn_3Sn 的倪爾溫度（計算值）為約 420 K。

【0033】 在本揭示的一個實施態樣中，反鐵磁性體層（即，$Mn_3A_{1-x}B_x$（$0<x<0.5$，A=Ga、Ge、Sn，B=Mg、Al、Si、P、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Ru、Ag、Cd、In、Sb、Os、Au、Hg、Tl、Pb）、或$(Mn_{1-p}Cr_p)_3Ga_qGe_rSn_{1-q-r}$（$0<p<0.5$、$0<q<1$、$0<r<1$、$0<q+r\leq 1$））在倪爾溫度以下具有與 Mn_3X（X=Ga、Ge、Sn）相同的團簇磁八極極化，所述 Mn_3X（X=Ga、Ge、Sn）成為在模擬計算中找到材料時的基準。

【0034】 在本揭示的一個實施態樣中，反鐵磁性體層的相同組成中的四方（Tetragonal）結構及六方（Hexagonal）結構的能量差具有較 Mn_3Sn 或 Mn_3Ga 的值小的值。

【0035】 在本揭示的一個實施態樣中，絕緣體層與兩個反鐵磁性體層直接相接。在另一實施態樣中，絕緣體層與反鐵磁性體層之間介隔一個以上的其他層。作為配置於反鐵磁性體層與絕緣體層之間的其他層，只要能夠藉由濺鍍、磊晶成長（分子束磊晶（Molecular beam epitaxy，MBE）、金屬有機氣相沈積（Metal Organic Chemical Vapor Deposition，MOCVD）等）等公知的成膜手段來成膜，則並無特別限定。作為此時的一個以上的其他層可例示包含 Ta 或 Ru 作為材料的層。

【0036】 [磁性體及絕緣體的雙層膜以及穿隧磁阻元件的製造方法]

磁性體及絕緣體的雙層膜以及穿隧磁阻元件可藉由如下流程而製成：（1）反鐵磁性體層 11 的製成；（2）絕緣體層 12 向反鐵磁

性體層 11 的積層；（3）第二反鐵磁性體層 13 向絕緣體層 12 的積層。以下，進行具體的說明。

【0037】 （1）反鐵磁性體層 11 的製成

反鐵磁性體層 11 可藉由如下方式而製成：藉由濺鍍、磊晶成長（MBE、MOCVD 等）等公知的成膜手段在作為電極的基板上使本揭示的材料成膜。在使用濺鍍的情況下，例如，作為靶材料而使用與作為進行成膜的對象的 $Mn_3A_{1-x}B_x$（$0<x<0.5$，A=Ga、Ge、Sn，B=Mg、Al、Si、P、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Ru、Ag、Cd、In、Sb、Os、Au、Hg、Tl、Pb）、或$(Mn_{1-p}Cr_p)_3Ga_qGe_rSn_{1-q-r}$（$0<p<0.5$、$0<q<1$、$0<r<1$、$0<q+r\leq1$）相同的材料。

【0038】 關於作為電極的基板的材料（基板電極層）可例示 W、Pt 或 Ta，其厚度典型而言為 1 nm-20 nm，較佳為 1 nm-5 nm。

【0039】 （2）絕緣體層 12 向反鐵磁性體層 11 的積層

接著，藉由濺鍍等公知的成膜手段在反鐵磁性體層 11 上使絕緣體層 12 成膜。在使用濺鍍的情況下，作為靶材料，可使用金屬的氧化物、氮化物、氧氮化物等。亦可使用在氧氣氛或氮氣氛下的反應性濺鍍。

【0040】 （3）第二反鐵磁性體層 13 向絕緣體層 12 的積層

接下來，第二反鐵磁性體層 13 可藉由如下方式而製成：藉由磊晶成長（MBE、MOCVD 等）等公知的成膜手段在絕緣體層 12 上使本揭示的材料成膜。

【0041】 在使用濺鍍的情況下，可例示與所述反鐵磁性體層 11 相

同的靶材料。

【0042】 [穿隧磁阻元件的動作]

圖 4 是表示穿隧磁阻元件的一實施態樣的剖面圖。在基板電極層 10 上，在反鐵磁性體層 11 的表面依次積層有絕緣體層 12、第二反鐵磁性體層 13。此處，作為基板電極層 10 的材料，可例示 W、Pt 或 Ta 來作為自旋流生成材料。

【0043】 反鐵磁性體層 11 的網狀的自旋極化方向較佳為垂直於反鐵磁性體層 11，但亦可傾斜。在所述穿隧磁阻元件中，電阻依賴於反鐵磁性體層 11 的自旋極化方向與第二反鐵磁性體層 13 的自旋極化方向的相對角度而發生變化。因此，藉由使反鐵磁性體層 11 的自旋極化方向旋轉，可切換低電阻狀態與高電阻狀態。此種穿隧磁阻元件可藉由使用切換前後的電阻值的差異作為儲存資訊而作為儲存單元來發揮功能。

【0044】 例如，當在基板電極層 10 中的層平行方向（例如圖 4 內水平虛線箭頭方向）流動電流時，由於自旋軌道相互作用，在與電流正交的方向上產生自旋流（自旋霍爾效應（spin Hall effect）），從而在反鐵磁性體層 11 內產生磁轉矩。藉由改變基板電極層 10 中的電流方向，而在反鐵磁性體層 11 內產生自旋極化方向旋轉。

【0045】 如之前所說明般，反鐵磁性體層 11 與第二反鐵磁性體層 13 可由相同的材料形成，亦可由不同的材料形成。就增大低電阻狀態與高電阻狀態之差的觀點而言，較佳為反鐵磁性體層 11 的自旋極化方向與第二反鐵磁性體層 13 的自旋極化方向朝向相互平行

的面內。即，若反鐵磁性體層 11 的自旋極化方向與層方向大致垂直，則較佳為第二反鐵磁性體層 13 的自旋極化方向亦與層方向大致垂直，若反鐵磁性體層 11 的自旋極化方向與層方向大致平行，則較佳為第二反鐵磁性體層 13 的自旋極化方向亦與層方向大致平行。

【0046】 在本揭示的穿隧磁阻元件中，根據反鐵磁性體層的表面的面取向，藉由在絕緣體層中使用特定的材料，可在比較高的溫度下獲得 TMR 比。

【0047】 [磁記憶體]

藉由使用多個所述說明的穿隧磁阻元件作為儲存單元，可構成磁記憶體。所述磁記憶體可使用公知的結構。例如，可使用美國專利申請案公開公報 2022/0149269 號及美國專利申請案公開公報 2019/0267540 中記載的磁記憶體的結構。將與磁記憶體的結構相關的美國專利申請案公開公報 2022/0149269 號及美國專利申請案公開公報 2019/0267540 的記載併入（incorporated）本說明書中。

【0048】 圖 5 是表示構成本揭示的磁記憶體的一部分的儲存單元的配線的一實施態樣的電路圖。如圖 5 所示的儲存單元以矩陣狀配置而被驅動。

【0049】 在各儲存單元內，在積層於基板電極層 10 的反鐵磁性體層 11 的表面依次積層有絕緣體層 12、第二反鐵磁性體層 13，並形成有穿隧磁阻元件。所述穿隧磁阻元件的動作與穿隧磁阻元件中說明的內容相同。

【0050】 在基板電極層 10 設置有兩個供電電極 15、15，供電電極 15、供電電極 15 分別與電晶體 19、電晶體 19 的源極連接。電晶體 19、電晶體 19 的閘極與字元線 17 連接，兩個電晶體 19、19 的汲極分別與第一寫入位元線 18 及第二寫入位元線 18’連接。第二反鐵磁性體層 13 經由電極 14 而與讀取位元線 16 連接。

【0051】 此處，在使電阻值變化來進行資料的切換的情況下，為了為一種資料狀態，而將第一寫入位元線 18 設定為 H 電平，將第二寫入位元線 18’設定為 L 電平。然後，藉由將字元線 17 設定為 H 電平，電流自第一寫入位元線 18 朝向第二寫入位元線 18’而在基板電極層 10 內流動，反鐵磁性體層 11 的自旋極化成為與所述電流對應的狀態，所述情況為一種資料狀態。

【0052】 在進行所述資料的切換的情況下，將第一寫入位元線 18 設定為 L 電平，將第二寫入位元線 18’設定為 H 電平。然後，藉由將字元線 17 設定為 H 電平，電流自第二寫入位元線 18’朝向第一寫入位元線 18 而在基板電極層 10 內流動，反鐵磁性體層 11 的自旋極化發生變化，從而資料被切換。

【0053】 在讀出儲存於儲存單元中的資料的情況下，將第一寫入位元線 18 與第二寫入位元線 18’中的任一者設定為 H 電平，並釋放另一者。然後，藉由將讀取位元線 16 設定為 L 電平，將字元線 17 設定為 H 電平，電流自第一寫入位元線 18 與第二寫入位元線 18’流向讀取位元線 16，因此藉由測定所述電流的大小，判別儲存單元處於高電阻狀態還是處於低電阻狀態，從而獲取儲存單元中

所寫的資料。

【0054】 在磁記憶體的一實施態樣中，藉由將如圖 4 所示的儲存單元排列於矩陣上，並利用控制器控制寫入位元線與讀取位元線、字元線的電平來進行規定的寫入讀取動作。

【0055】 在本實施態樣的磁記憶體中，根據反鐵磁性體層的表面的面取向，藉由在反鐵磁性體層中使用特定的材料，可在比較高的溫度下獲得讀取訊號。

【0056】 顯然，根據所述指點，能夠實現本發明的許多修改及變形。因此，應理解，在隨附的申請專利範圍內，本發明可利用本說明書中具體記載以外的方法來實施。

[產業上之可利用性]

【0057】 本發明的反鐵磁性體材料、磁性體及絕緣體的雙層膜可用作穿隧磁阻元件及磁記憶體。

【符號說明】

【0058】

10:基板電極層

11:反鐵磁性體層

12:絕緣體層

13:第二反鐵磁性體層

14:電極

15:供電電極

19:電晶體

17:字元線

18:第一寫入位元線

18':第二寫入位元線

16:讀取位元線

【發明申請專利範圍】

【請求項1】 一種反鐵磁性體材料，具有六方晶的結晶結構，且包含 $Mn_3A_{1-x}B_x$（$0<x<0.5$，A=Ga、Ge、Sn，B=Mg、Al、Si、P、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Ru、Ag、Cd、In、Sb、Os、Au、Hg、Tl、Pb）、或$(Mn_{1-p}Cr_p)_3Ga_qGe_rSn_{1-q-r}$（$0<p<0.5$、$0<q<1$、$0<r<1$、$0<q+r\leq 1$）。

【請求項2】 如請求項 1 所述的反鐵磁性體材料，其中，A 為 Ga 及 Sn 中的至少一者。

【請求項3】 如請求項 1 或 2 所述的反鐵磁性體材料，其中，B 為 Mg、Al、Si、Mn、Cu、Zn、Ag、Cd、In、Sb、Au、Tl 中的至少一個。

【請求項4】 如請求項 1 或 2 所述的反鐵磁性體材料，其中，$0<x<0.5$、$0<p<0.5$、$0.2<q<0.8$ 且 $r<0.5$。

【請求項5】 一種磁性體及絕緣體的雙層膜，具有包括如請求項 1 至 4 中任一項所述的反鐵磁性體材料的層、及包括積層於包含反鐵磁性體材料的層上的絕緣體的層。

【請求項6】 一種穿隧磁阻元件，具有如請求項 5 所述的磁性體及絕緣體的雙層膜、及積層於雙層膜的絕緣體上的第二反鐵磁性體層。

【請求項7】 一種磁記憶體，包括多個如請求項 6 所述的穿隧磁阻元件。

【請求項8】 一種反鐵磁性體材料，具有六方晶的結晶結構，且包含 $Mn_3A_{1-x}B_x$（$0<x<0.5$，A=Ga、Ge、Sn，B=Mg、Al、Si、P、Mn、

Ni、Cu、Zn、Ru、Ag、Cd、In、Os、Au、Hg、Tl）、或$(Mn_{1-p}Cr_p)_3Ga_qGe_rSn_{1-q-r}$（$0<p<0.5$、$0<q<1$、$0<r<1$、$0<q+r\leq 1$）。

【請求項9】 如請求項 1 所述的反鐵磁性體材料，其中，A 為 Ga 及 Sn 中的至少一者。

【請求項10】 如請求項 8 或 9 所述的反鐵磁性體材料，其中，B 為 Mg、Al、Si、Mn、Cu、Zn、Ag、Cd、In、Au、Tl 中的至少一個。

【請求項11】 如請求項 8 或 9 所述的反鐵磁性體材料，其中，$0<x<0.5$、$0<p<0.5$、$0.2<q<0.8$ 且 $r<0.5$。

【請求項12】 一種磁性體及絕緣體的雙層膜，具有包括如請求項 8 至 11 中任一項所述的反鐵磁性體材料的層、及包括積層於包含反鐵磁性體材料的層上的絕緣體的層。

【請求項13】 一種穿隧磁阻元件，具有如請求項 12 所述的磁性體及絕緣體的雙層膜、及積層於雙層膜的絕緣體上的第二反鐵磁性體層。

【請求項14】 一種磁記憶體，包括多個如請求項 13 所述的穿隧磁阻元件。